

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Martin Petek

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Student:

Martin Petek

Zagreb, 2017.

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu na ukazanom povjerenju i stručnoj pomoći tokom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem asistentu Ivanu Primorcu, mag. ing. mech. na pomoći prilikom izvođenja svih ispitivanja.

Zahvaljujem se poduzeću Oprema d.d. na uzorcima, dokumentaciji i općoj podršci u izradi ovog rada.

Na kraju se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci tokom studija.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa:                              |        |
| Ur.broj:                            |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARTIN PETEK**

Mat. br.: 0035196568

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TROŠENJE ALATA ZA SAVIJANJE CIJEVI**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WEAR OF TUBE BENDING TOOLS**

Opis zadatka:

Alati za savijanje mogu se koristiti za savijanje cijevi koje će imati različitu primjenu i ta primjena može utjecati na izbor materijala za izradu alata. Jedna od takvih primjena je u prehrambenoj industriji koja zahtjeva neke specifične uvjete rada (npr. izbjegavanje podmazivanja).

U ovom radu je potrebno:

- 1) Opisati uređaj i alat za savijanje cijevi.
- 2) Zamijeniti materijal alata materijalom koji ne zahtjeva podmazivanje.
- 3) Provesti eksploatacijsko ispitivanje alata.
- 4) Analizirati trošenje zamjenskog alata.
- 5) Provesti prateća ispitivanja te dati zaključak.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

*K. Grilec*

Prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

*Branko Bauer*

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| POPIS SLIKA.....                                       | 6  |
| POPIS TABLICA.....                                     | 8  |
| POPIS OZNAKA.....                                      | 9  |
| SAŽETAK.....   | 10 |
| SUMMARY.....   | 11 |
| 1. Uvod.....   | 12 |
| 2. CNC stroj za savijanje cijevi.....                  | 13 |
| 2.1. Alat za savijanje cijevi.....                     | 16 |
| 3. Tribologija.....                                    | 17 |
| 3.1. Abrazija.....                                     | 17 |
| 3.1.1. Otpornost na abraziju.....                      | 19 |
| 3.2. Adhezijsko trošenje.....                          | 19 |
| 3.2.1. Otpornost na adheziju.....                      | 20 |
| 3.3. Umor površine.....                                | 20 |
| 3.3.1. Otpornost na umor površine.....                 | 21 |
| 4. Eksperimentalni dio.....                            | 21 |
| 4.1. Eksploatacijsko ispitivanje polimernih alata..... | 21 |
| 4.2. Analiza trošenja brončanog alata.....             | 29 |
| 4.2.1. SEM i EDS analiza.....                          | 29 |
| 4.2.2. Optička analiza površine trošenja.....          | 34 |
| 4.2.3. Metalografska analiza.....                      | 35 |
| 5. Zaključak.....                                      | 49 |
| Popis literature.....                                  | 40 |
| Prilozi.....   | 41 |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Prednji dio stroja za savijanje cijevi.....   | 13 |
| Slika 2. Sustav valjaka za vođenje cijevi.....   | 14 |
| Slika 3. Mjesto savijanja.....   | 14 |
| Slika 4. Zavojnica u izradi.....   | 15 |
| Slika 5. Zaštitni kavez.....   | 16 |
| Slika 6. Alati za savijanje cijevi.....  | 17 |
| Slika 7. Jedinični događaj abrazije [2].....   | 18 |
| Slika 8. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [3].....  | 18 |
| Slika 9. Jedinični događaj adhezije [2].....   | 19 |
| Slika 10. Jedinični događaj umora površine [2].....  | 20 |
| Slika 11. Vaganje neočišćenog potrošenog alata nakon eksploatacije.....  | 22 |
| Slika 12. Čišćenje polimernog alata.....   | 22 |
| Slika 13. Ultrazvučno čišćenje polimernog alata.....   | 23 |
| Slika 14. Grafički prikaz gubitaka mase polimernog alata koji je savijao bakrenu cijev....                                 | 24 |
| Slika 15. Grafički prikaz gubitka mase polimernog alata koji je savijao cijev od nehrđajućeg čelika.....                   | 25 |
| Slika 16. Alati nakon eksploatacije, s lijeva: polimerni (savijao bakar), polimerni (savijao nehrđajući čelik).....        | 25 |
| Slika 17. Alati nakon ultrazvučnog čišćenja, od gore: polimerni (savijao nehrđajući čelik), polimerni (savijao bakar)..... | 26 |
| Slika 18. Dodirne površine alata (nakon čišćenja).....   | 27 |
| Slika 19. Durometar.....   | 28 |
| Slika 20. SEM-EDS uređaj [6].....  | 29 |
| Slika 21. Odabrano područje za EDS analizu.....  | 30 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 22. Rezultat EDS analize.....                               | 30 |
| Slika 23. Rezultat EDS analize.....                               | 30 |
| Slika 24. Dijagram stanja Cu-Al [10].....                         | 31 |
| Slika 25. Čestice.....  | 33 |
| Slika 26. Rezultat EDS analize čestica.....                       | 33 |
| Slika 27. Tragovi trošenja brončanog alata (povećanje 7.88x)..... | 34 |
| Slika 28. Tragovi trošenja brončanog alata (povećanje 20x).....   | 35 |
| Slika 29. Slikanje mikrostrukture na mikroskopu.....              | 36 |
| Slika 30. Mikrostruktura alata, povećanje 100x.....               | 36 |
| Slika 31. Mikrostruktura alata, povećanje 1000x.....              | 37 |
| Slika 32. Tvrdomjer PMT3 [8].....                                 | 38 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Rezultati vaganja i gubitci mase alata.....          | 24 |
| Tablica 2. Ovisnost ukupnog gubitka mase o broju savijanja..... | 26 |
| Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće polimernih alata.....     | 28 |
| Tablica 4. Podaci mjerenja tvrdoće.....                         | 38 |



## POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis        |
|--------|----------|-------------|
| F      | N        | Sila        |
| m      | kg       | Masa        |
| p      | Pa       | Tlak        |
| T      | K        | Temperatura |
| v      | m/s      | Brzina      |
| Ø      | m        | Promjer     |

## SAŽETAK

Savijanje cijevi važan je tehnološki proces, a trošenje alata za savijanje je važan parametar tog procesa. Svaka industrija prilagođava postojeće tehnologije svojim zahtjevima. Tvrtka Oprema d.d. zamijenila je brončane alate za savijanje poliamidnima kako bi se eliminirala potreba za podmazivanjem koje nije prihvatljivo u njihovoj grani industrije. U ovom radu analizirano je trošenje brončanog i poliamidnih alata za savijanje cijevi te je provedeno eksploatacijsko ispitivanje na poliamidnim alatima kako bi se odredilo ima li materijal cijevi koja se savija utjecaj na trošenje. Također su provedene SEM, EDS i metalografska analiza brončanog alata s ciljem otkrivanja točne vrste materijala.

## **SUMMARY**

Tube bending is an important technological process and therefore the wear of tube bending tools is an important parameter of that process. Every industry modifies existing technologies to fit its needs. A company named Oprema d.d. switched its bronze tube bending tools with polyamide ones to eliminate the need for lubrication which isn't acceptable in its industry. This paper contains wear analyses of bronze and polyamide tube bending tools. Also, a field test is conducted to determine whether different tube materials cause different degrees of wear on polyamide tools. To determine the type of the bronze material, SEM, EDS and metallographic analyses are conducted.

# 1. Uvod

Savijanje cijevi važan je tehnološki postupak u mnogim industrijama poput automobilske, termo-energetske, prehrambene i dr. Svaka industrija modificira postupak savijanja kako bi se ispunili određeni zahtjevi poput povećanja produktivnosti, povećanja točnosti, izbjegavanja kontaminacije cijevi i dr. U ovom radu će se analizirati svojstva i trošenje alata CNC stroja za savijanje cijevi. Analiza će se provesti na alatima načinjenim od nepoznate sinterirane bronce i polimera PA6.

Strojevi za savijanje cijevi s kojih su skinuti potrošeni alati za analizu nalaze se u poduzeću Oprema d.d. u Ludbregu. Budući da se poduzeće bavi proizvodnjom rashladnih uređaja za ugostiteljstvo, čistoća pogona je od ključne važnosti. Prilikom savijanja cijevi koristeći brončani alat potrebno je podmazivati mjesto savijanja čime se kontaminira cijev. Unatoč tome što se za podmazivanje koristi lako hlapljivo ulje, cijev je potrebno odmastiti prije ugradnje u uređaj. Kako bi se izbjegao taj dodatni korak u proizvodnji, brončani alati su zamijenjeni alatima od poliamida (PA6) koji ne zahtijevaju podmazivanje.

Savijaju se cijevi od nehrđajućeg čelika (ISO 1.4404) i bakra promjera Ø9.5 mm. Kemijski sastavi i mehanička svojstva cijevi nalaze se u prilogu. Zbog različitih svojstava materijala cijevi dolazi do različitog ponašanja tribosustava cijev-alat. Kako bi se usporedile različitosti tih tribosustava, provedeno je eksploatacijsko ispitivanje čiji se rezultat i njegova analiza nalaze u nastavku ovog rada.

## 2. CNC stroj za savijanje cijevi

Proizvođač stroja za savijanje je talijansko poduzeće „Sistemi Meccanici Industriali“, a naziv modela je „Silver CD“. Radi se o numerički upravljanom stroju za čiji je rad potrebno izraditi program koji operater stroja učitava i zatim nadgleda operacije stroja.



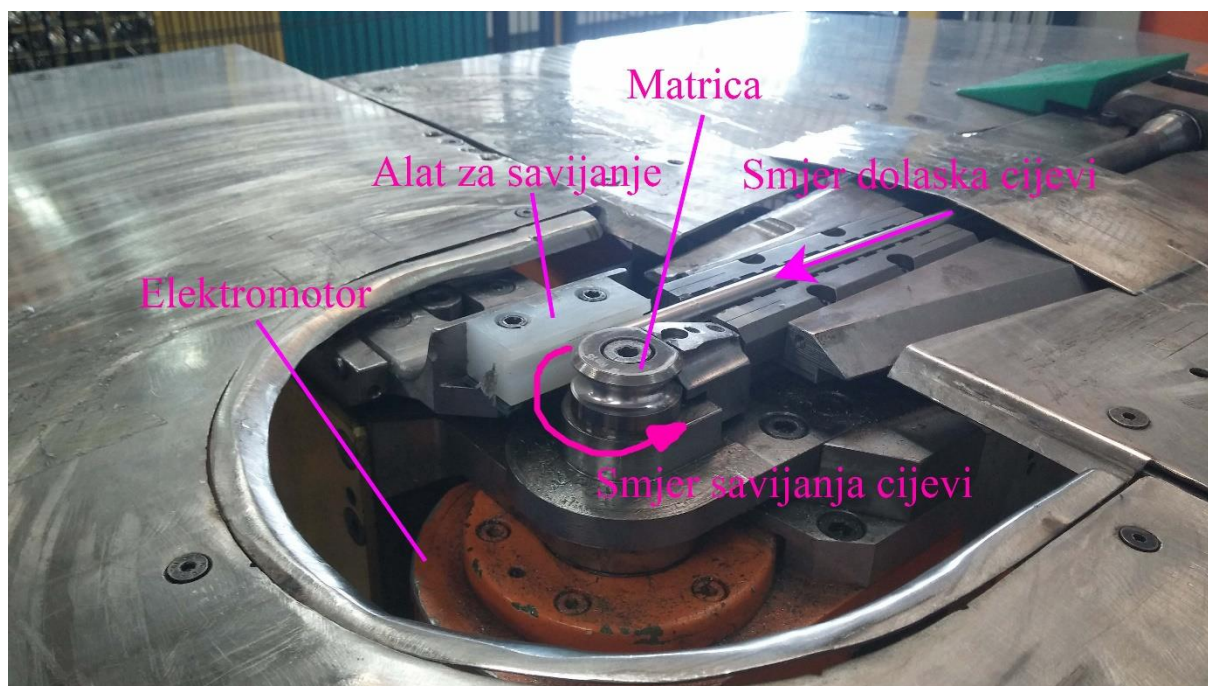
*Slika 1. Prednji dio stroja za savijanje cijevi*

Na slici 1. se vidi rotirajući stol na kojemu se nalazi kolut cijevi koja se uvlači u stroj pomoću sustava valjaka koji su vidljivi na slici 2.



Slika 2. Sustav valjaka za vođenje cijevi

Valjci na slici 2. osim što vode cijev do alata za savijanje imaju zadaću da je izravnavaju.



Slika 3. Mjesto savijanja



Na slici 3. su označeni osnovni dijelovi sustava za savijanje cijevi. Postupak počinje izlaskom cijevi iz sustava za vođenje. Na poziciji određenoj u programu izlazak cijevi staje te označeni elektromotor pokreće alat za savijanje u označenoj putanji kružnice prilikom čega se cijev usmjeruje utorima u matrici i alatu za savijanje te na taj način dolazi do savijanja cijevi hladnom deformacijom.



*Slika 4.      Zavojnica u izradi*

Sklop sa sustavom za savijanje može rotirati oko osi izlaska cijevi čime se kod izrade zavojnica određuje kut uspona svakog pojedinog zavoja. Na slici 3. sustav za savijanje je u početnom horizontalnom položaju, dok je na slici 4. zarotiran za devedeset stupnjeva. Nakon što su obavljena sva savijanja izratka, stroj reže cijev na zadanom mjestu te je spreman za sljedeći ciklus. Zadaće operatera stroja su: montaža koluta cijevi na stroj, pokretanje programa, praćenje rada stroja i uklanjanje izradaka.



*Slika 5.        Zaštitni kavez*

S obzirom na to da je stroj numerički upravljani, potrebno je osigurati njegovo radno područje kako ne bi došlo do ozljeđivanja radnika u prolazu ili sudara pokretnih dijelova stroja sa stvarima odloženim u blizini. Zaštitni kavez prikazan na slici 5. služi upravo tome.

## **2.1.    Alat za savijanje cijevi**

U prilogu se nalazi tehnički crtež alata za savijanje cijevi promjera 9.5 mm. Alat ima dvije rupe s upuštanjem kroz koje se vijcima pričvršćuje na držač (slika 3.) te jedan izrez koji pomaže kod postavljanja alata na držač.





*Slika 6. Alati za savijanje cijevi*

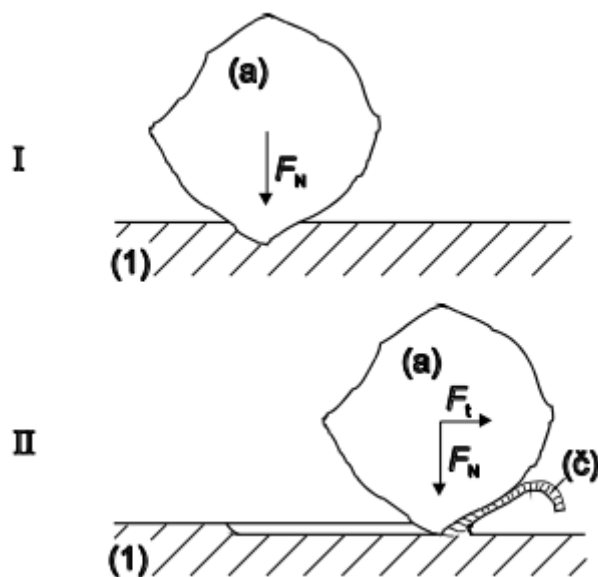
Na slici 6. se može vidjeti jedan brončani potrošeni alat i dva potrošena polimerna alata.

### **3. Tribologija**

Prilikom eksploatacije alata za savijanje cijevi dolazi do njihovog trošenja abrazijom, adhezijom i umorom površine. Elementi tribosustava su alat za savijanje cijevi i cijev.

#### **3.1. Abrazija**

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama [1].

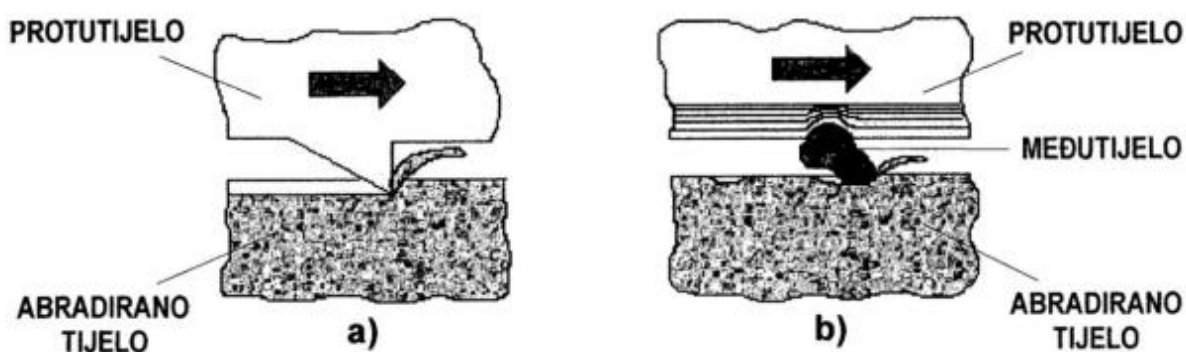


Slika 7. Jedinični događaj abrazije [2]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze [1]:

I faza – prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ .

II faza – istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$ .



Slika 8. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [3]

Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije, prikazani na slici 8. [1]:

- a) Abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazivno protutijelo)

- b) Abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

### 3.1.1. Otpornost na abraziju

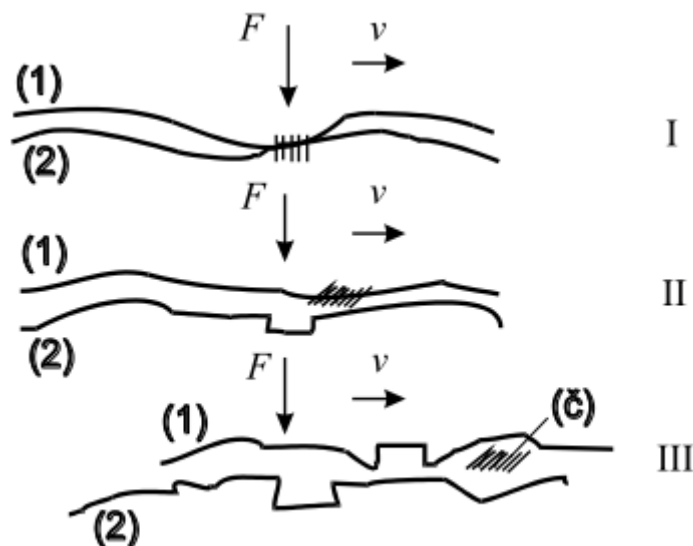
Na otpornost I. faze abrazije (prodiranje abraziva u površinu materijala) najznačajnije utječe omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene površine.

Na otpornost na II fazu mehanizma abrazije (istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja) najutjecajniji čimbenik je način napredovanja pukotine koji općenito može biti [1]:

- duktilni
- krhki
- umor (površine)

### 3.2. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza [1].



Slika 9. Jedinični događaj adhezije [2]

Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze [1]:

Faza I – Nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina.

Faza II – Raskidanje adhezijskog spoja. Čestica trošenja ostaje spontano „nalijepljena“ na jednom članu kliznog para.

Faza III – Otkidanje čestice (eventualno). Oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićast.

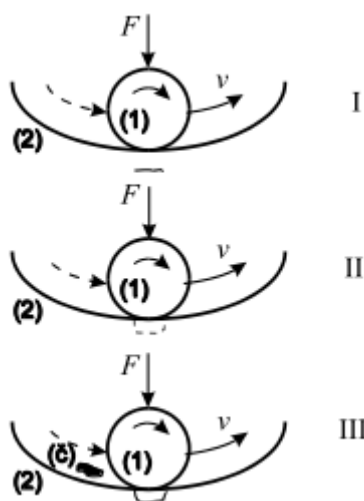
### 3.2.1. Otpornost na adheziju

Otpornost na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti stvaranju mikrozavarenih spojeva kliznog para i jakosti uspostavljenih adhezijskih veza. Osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara je njihova tribološka kompatibilnost.

Tribološka kompatibilnost je prikladnost za rad u kliznom paru i bolja je za materijale koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru. Suprotna je metalurškoj kompatibilnosti. [1]

### 3.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja [1].



Slika 10. Jedinični događaj umora površine [2]

Jedinični događaj umora površine, prikazan na slici 10., odvija se u tri faze [1]:

Faza I – Stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine zbog toga što je najveće tangencijalno naprezanje uvijek ispod same površine.

Faza II – Napredovanje mikropukotine do površine i izlazak sitnih kuglastih čestica iz nje.

Faza III – Ispadanje čestice trošenja, obično oblika pločice ili iverka. Ostavlja oštećenje u obliku rupice.

### **3.3.1. Otpornost na umor površine**

Otpornost na umor površine naziva se i dinamička izdržljivost površine. Ovisi o otporu gibanja dislokacija, a na njega utječe velik broj čimbenika [4]:

- podpovršinski koncentratori naprezanja,
- površinska obilježja,
- površinske pogreške,
- diskontinuiteti u geometriji dodira,
- raspodjela opterećenja u ležaju,
- elastohidrodinamika,
- tangencijalne sile.

## **4. Eksperimentalni dio**

U sklopu eksperimentalnog dijela ovog rada provodi se eksploatacijsko ispitivanje polimernih alata i analiza trošenja te identifikacija materijala alata od sinterirane bronce.

### **4.1. Eksploatacijsko ispitivanje polimernih alata**

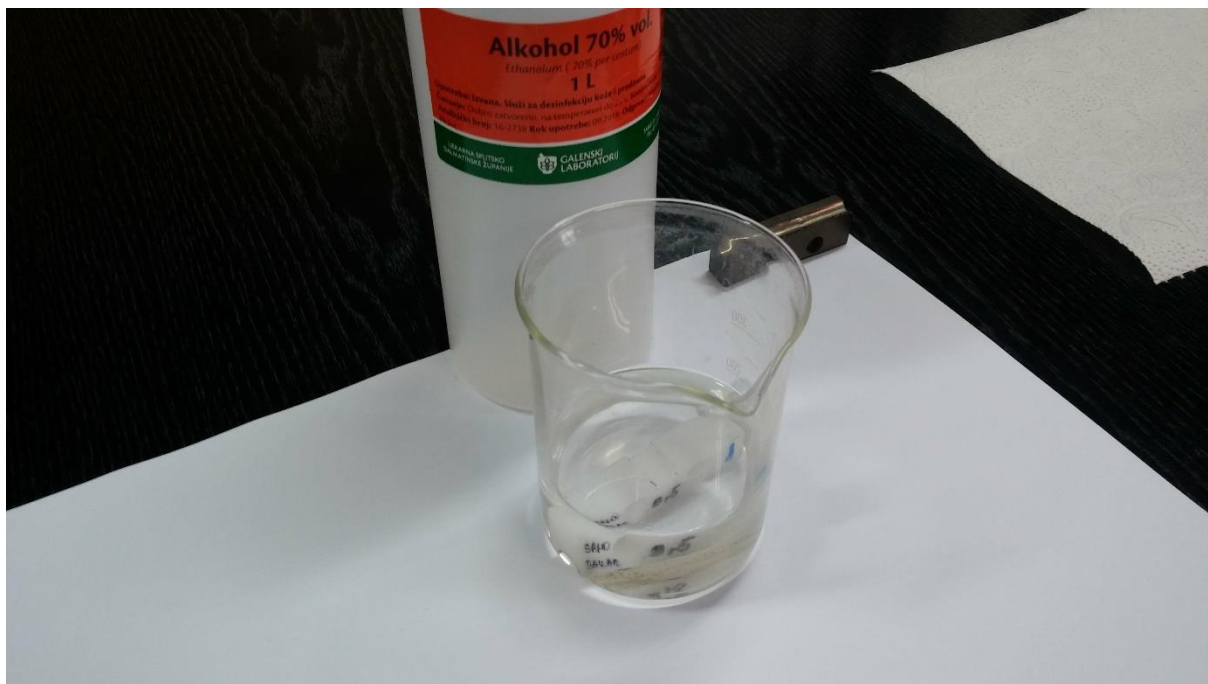
Eksploatacijsko ispitivanje provedeno je na dva polimerna alata (PA6) od kojih je jedan savijao samo bakrenu cijev, a drugi samo cijev od nehrđajućeg čelika ISO 1.4404. Alati su bili u eksploataciji sve dok operater nije procijenio na osnovi svog iskustva da ih je potrebno promijeniti. Alati su izvagani prije eksploatacije, nakon eksploatacije prije čišćenja i nakon eksploatacije poslije čišćenja. Uz poznati broj savijanja koji je svaki alat obavio dolazi se do skupa podataka na osnovu kojih je moguće usporediti utjecaj vrste materijala koji se savija na

način i intenzitet trošenja alata. Dokumenti iz pogona na osnovu kojih su izračunati brojevi savijanja pojedinog alata nalaze se u prilogu.



*Slika 11. Vaganje neočišćenog potrošenog alata nakon eksploatacije*

Na slici 11. je prikazano vaganje neočišćenog polimernog alata koji je savijao bakrenu cijev na vagi Radwag WLC 1/A2/C/2.



*Slika 12. Čišćenje polimernog alata*

Prije čišćenja pomoću ultrazvuka alat je ostavljen nekoliko minuta u 70%-tnoj otopini etanola kako bi se otopile nečistoće. Zatim se čaša s etanolom i alatom stavlja u komoru uređaja za ultrazvučno čišćenje te se prostor oko čaše napuni vodom do razine etanola u čaši.



*Slika 13. Ultrazvučno čišćenje polimernog alata*

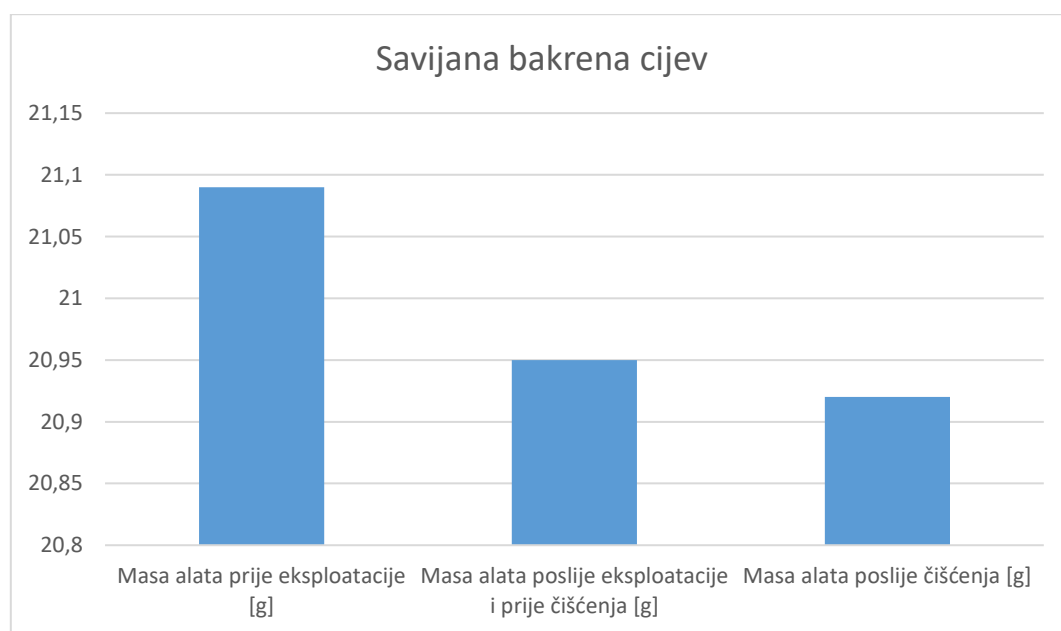
Nakon toga se postavlja željeno vrijeme čišćenja, u ovom slučaju 180 sekundi, te se pali uređaj.

Navedeni sustav „voda-čaša-etanol“ korišten je kako bi se minimizirala količina potrošenog etanola prilikom čišćenja. Voda i staklo prenose ultrazvuk jednako kao i što bi ga prenosio samo etanol od stjenki uređaja do alata.

Čišćenje ultrazvukom funkcionira tako da se ultrazvuk iz generatora ultrazvuka širi kroz medij (voda, etanol) prilikom čega nastaju mikroskopski kavitacijski mjehurići prilikom čije implozije se mogu postići temperature reda veličine 5000 K i tlakovi reda veličine 140 MPa. Unatoč relativno velikoj oslobođenoj energiji prilikom implozije mjehurića, zbog njihove mikroskopske veličine najviše „štete“ koju mogu prouzročiti je uklanjanje površinskih nečistoća. Što je viša frekvencija ultrazvuka, to su udaljenosti između mjehurića manje te je samim time čišćenje detaljnije. [5]

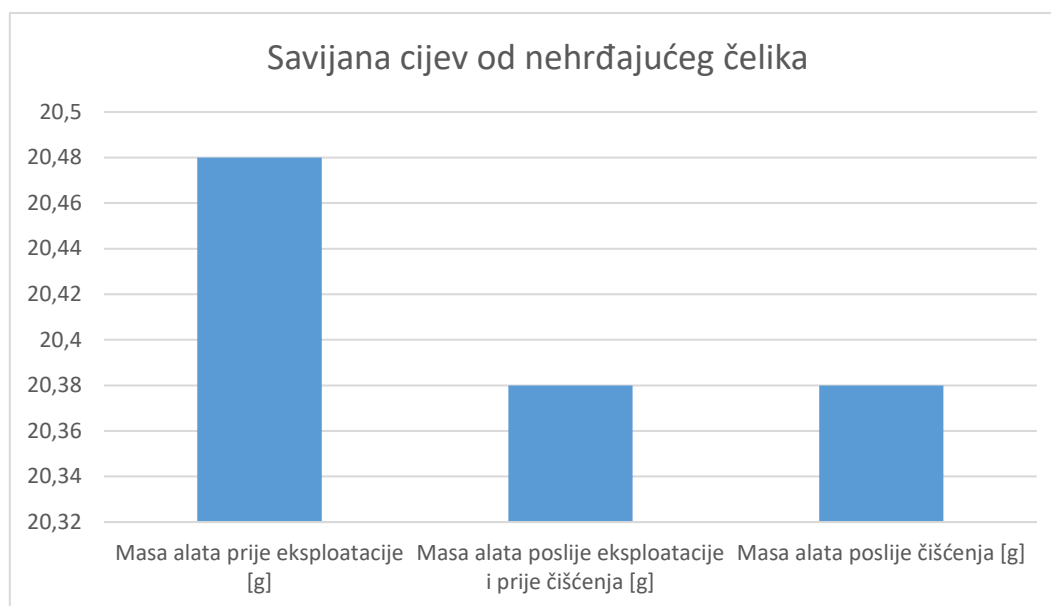
| Materijal<br>cijevi         | Masa alata<br>prije<br>eksploatacije,<br>$m_1$ [g] | Masa alata<br>poslije<br>eksploatacije<br>i prije<br>čišćenja, $m_2$<br>[g] | $\Delta m_b = m_2 - m_1$<br>[g] | Masa<br>alata<br>poslije<br>čišćenja,<br>$m_3$ [g] | $\Delta m_a = m_3 - m_2$ [g] |
|-----------------------------|--|---|---------------------------------|--|------------------------------|
| <b>Bakar</b>                | 21,09  | 20,95   | -0,14                           | 20,92  | -0,03                        |
| <b>Nehrdajući<br/>čelik</b> | 20,48  | 20,38   | -0,1                            | 20,38  | 0,00                         |

Tablica 1. Rezultati vaganja i gubitci mase alata



Slika 14. Grafički prikaz gubitaka mase polimernog alata koji je savijao bakrenu cijev





*Slika 15. Grafički prikaz gubitka mase polimernog alata koji je savijao cijev od nehrđajućeg čelika*

U tablici 1. prikazane su mase alata prije eksploatacije, poslije eksploatacije i nakon čišćenja. Gubitak mase za vrijeme eksploatacije će se analizirati u nastavku kada se ovim podacima pridruže brojevi obavljenih savijanja pojedinog alata. U ovim podacima možemo uočiti kako je alat koji je savijao bakrenu cijev nakon čišćenja izgubio 0,03 g dok je alat koji je savijao nehrđajući čelik ostao iste mase. Pogledom na sliku 16. možemo uočiti da prije čišćenja, alat koji je savijao bakar (lijevi) sadrži mnogo bakrenih čestica utisnutih u poliamid. Alat s desne strane je savijao nehrđajući čelik te ne sadrži ni približno toliko velik broj metalnih nečistoća.



*Slika 16. Alati nakon eksploatacije, s lijeva: polimerni (savijao bakar), polimerni (savijao nehrđajući čelik)*



*Slika 17. Alati nakon ultrazvučnog čišćenja, od gore: polimerni (savijao nehrđajući čelik), polimerni (savijao bakar)*

Na slici 17. možemo uočiti prilično jednaku kontaminaciju alata nakon ultrazvučnog čišćenja, a s obzirom da je alat koji je savijao bakrenu cijev bio znatno kontaminiraniji prije čišćenja, tome pripisujemo razliku gubitaka masa  $\Delta m_a$ .

| <b>Materijal cijevi</b> | <b><math>\Delta m_b + \Delta m_a</math></b> | <b>Broj savijanja</b> | <b><math>(\Delta m_b + \Delta m_a)</math> po jednom savijanju</b> |
|-------------------------|---|-----------------------|---|
| <b>Bakar</b>            | 0,17  | 28 228                | $6,02 \times 10^{-6}$   |
| <b>Nehrđajući čelik</b> | 0,1   | 23 562                | $4,24 \times 10^{-6}$   |

*Tablica 2. Ovisnost ukupnog gubitka mase o broju savijanja*

Veća kontaminacija alata bakrenim česticama pripisuje se manjoj dinamičkoj izdržljivosti bakra u odnosu na nehrđajući čelik zbog čega dolazi do odlamanja većeg broja čestica trošenja bakra te njihove impregnacije u mekši polimerni alat. Navedene impregnirane čestice tvore dodatne oštre rubove koji doprinose povećanju intenziteta abrazije u tribosustavu te time dovode do većeg gubitka mase po savijanju bakrene cijevi u odnosu na cijev od nehrđajućeg

čelika. Ovaj rezultat suprotan je očekivanom, jer logičnije je da će abrazija biti intenzivnija prilikom savijanja tvrdog i čvršćeg materijala. Kod savijanja cijevi od nehrđajućeg čelika vjerojatno je došlo do kompaktiranja površinskog sloja polimernog alata u kontaktu, a samim time i povećanja njegove tvrdoće i smanjenja hrapavosti što je poboljšalo klizna svojstva tribosustava te smanjilo trenje i trošenje. Tome u prilog ide i slika 18. koja prikazuje zaglađeni dio površine alata koji je savijao cijev od nehrđajućeg čelika (desno). Tako zaglađene površine nema na alatu koji je savijao bakrenu cijev (lijevo).



Slika 18. Dodirne površine alata (nakon čišćenja)



*Slika 19. Durometar*

Slika 19. prikazuje durometar konfiguriran za mjerenje tvrdoće po Shore-u D. Sila kojom indenter prodire u polimer iznosi 50N, a postiže se valjkastim utegom vidljivim na slici.

| Mjerenja tvrdoće - Shore D |           |
|----------------------------|-----------|
| 80                         | 78        |
| 80                         | 80        |
| 77                         | 81        |
| 78                         | 80        |
| 79                         | 81        |
| <b>Srednja vrijednost</b>  | <b>79</b> |

*Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće polimernih alata*

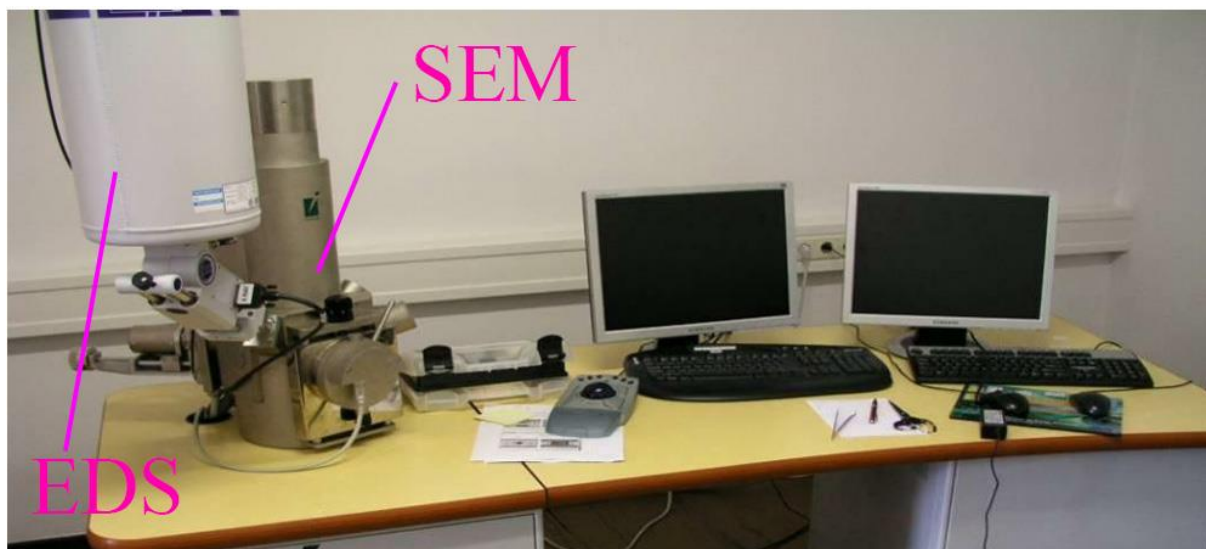
U Tablici 3. prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće alata od poliamida. Provodi se deset mjerenja te se njihova aritmetička sredina uzima za vrijednost tvrdoće. Vrijednost 79 po Shore-u D znači da se radi o vrlo tvrdom polimeru što je i logično s obzirom na namjenu alata.

## 4.2. Analiza trošenja brončanog alata

U početku pisanja ovog rada poznati podaci o brončanom alatu su bili da se radi o alatu od sinterirane bronce proizvedenom u talijanskom poduzeću Ampco Metal. Kako bi se odredilo o kojoj vrsti bronce se radi, provodi se EDS (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy*) analiza na SEM (*Scanning electron microscope*) uređaju te metalografska analiza.

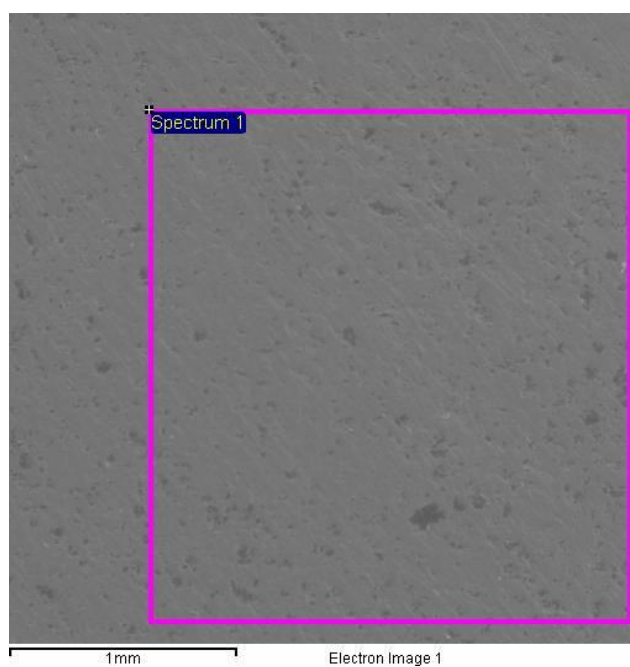
### 4.2.1. SEM i EDS analiza

Analiza je provedena na TESCAN VEGA 5136 MM skenirajućem elektronskom mikroskopu i OXFORD INSTRUMENTS INCAx-sight energijskom disperzivnom spektroskopu.

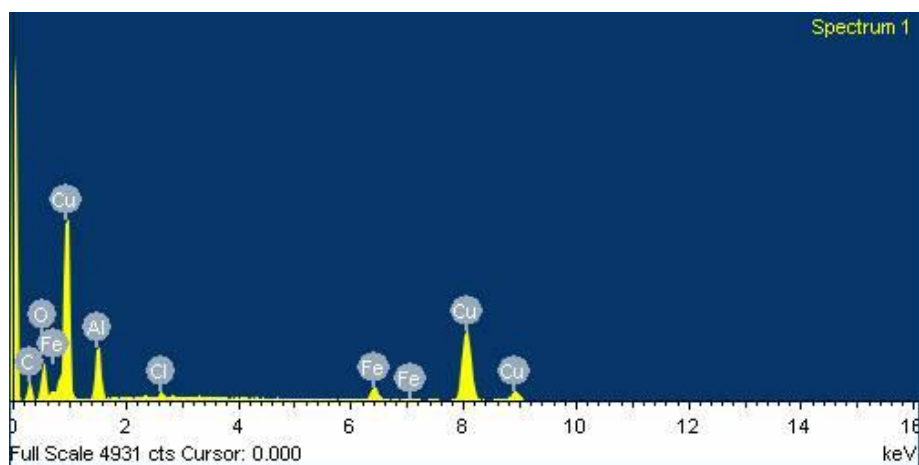


Slika 20. SEM-EDS uređaj [6]

Kako bi se dobio prosječan kemijski sastav SEM se postavlja na malo povećanje te se odabire relativno veliko područje za EDS analizu, prikazano na slici 21.



Slika 21. Odabrano područje za EDS analizu



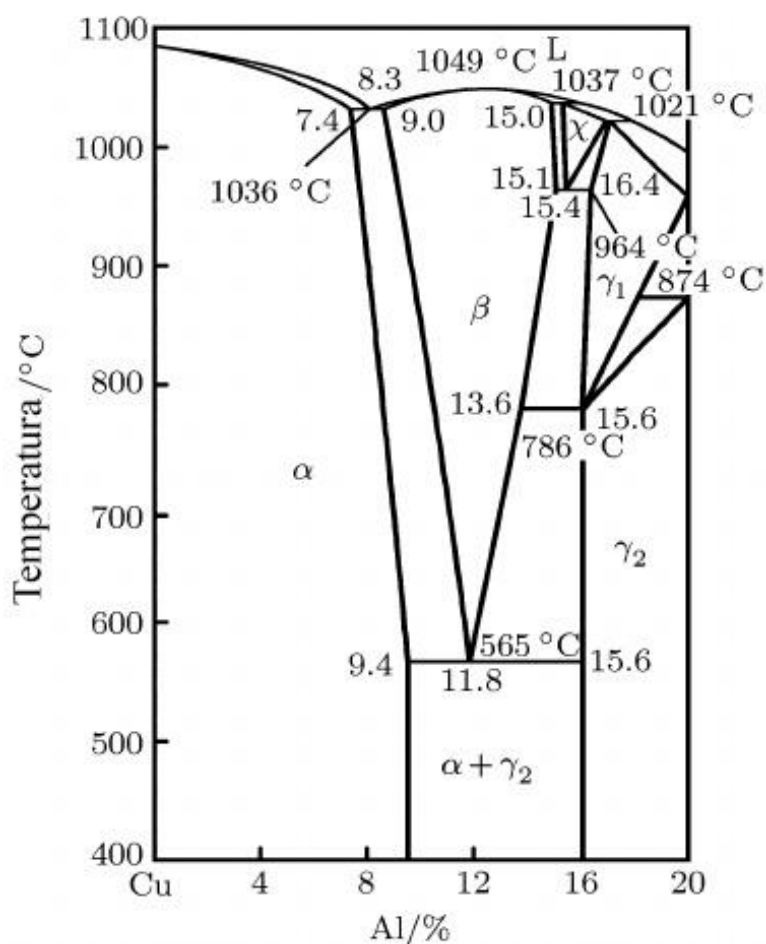
Slika 22. Rezultat EDS analize

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 20.37   | 45.05   |
| O K     | 13.31   | 22.09   |
| Al K    | 8.28    | 8.15    |
| Cl K    | 0.67    | 0.50    |
| Fe K    | 4.01    | 1.91    |
| Cu K    | 53.36   | 22.30   |
| Totals  | 100.00  |         |

Slika 23. Rezultat EDS analize

Iz rezultata EDS analize prikazanim na slici 22. i slici 23. možemo zaključiti da se radi o aluminijskoj bronci legiranoj željezom. Pretragom kataloga prije navedenog proizvođača te usporedbom kemijskog sastava proizvoda iz specifikacija sa rezultatom EDS analize može se zaključiti da je alat najvjerojatnije napravljen od AMPCO 15 legure [7]. Tehnički podaci o leguri nalaze se u prilogu rada.

Aluminijeve bronce mogu se podijeliti na dvije grupe: (hladno i toplo) oblikovljive i livljive. Mikrostruktura aluminijskih bronci može se sastojati od  $\alpha$ -faze kristala mješanca,  $\beta$ -faze kristala mješanca,  $\gamma_2$ -faze intermetalnog spoja  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  i  $\beta'$ -faze dobivene gašenjem.  $\beta'$ -faza je tvrda i krhka te prilikom formiranja poprima igličast oblik zrna kao i martenzit u čelicima. Popuštanjem  $\beta'$ -faze dolazi do precipitacije finih nakupina  $\alpha$ - i  $\gamma_2$ -faza.  $\gamma_2$ -faza je kao i većina intermetalnih spojeva tvrda i krhka. [9]



Slika 24. Dijagram stanja Cu-Al [10]



Slika 24. prikazuje da se do 9,4 %Al na sobnoj temperaturi mikrostruktura bronce sastoji od  $\alpha$ -faze dobre oblikovljivosti. Za legure s više od 9,4 %Al na sobnoj temperaturi se javlja  $\gamma_2$ -faza koja čini tu leguru tvrdom i čvršćom. [9].

Prilikom sporog hlađenja  $\alpha+\beta$  legura sa temperatura viših od 600 °C  $\beta$ -faza se transformira u  $\alpha+\gamma_2$  faze, slično popuštanju  $\beta'$ -faze. Formacija  $\gamma_2$ -faze osim očvršnuća uzrokuje i pad otpornosti na koroziju. Ukoliko se  $\gamma_2$ -faza formira kao kontinuirana mreža, korozijski procesi mogu duž nje penetrirati u materijal. Cilj je dobiti mala izolirana područja  $\gamma_2$ -faze jer tada korozija staje u površinskom sloju materijala. Formiranje  $\gamma_2$ -faze sprječava se držanjem udjela aluminija ispod 9,1 % ili brzim hlađenjem (gašenjem) sa temperature 600 °C. [11]

Svi iznad navedeni podaci odnose se isključivo na aluminijske bronce bez legirnih elemenata. Legiranje željezom usporava formaciju  $\gamma_2$ -faze, odnosno sprječava njezinu formaciju u obliku kontinuirane mreže. Željezo također doprinosi formaciji finijih zrna. Udio od oko 2% željeza je dovoljan za komade presjeka do 75 mm dok ga je za veće presjeke potrebno povećati. Nikal ima isto djelovanje na aluminijske bronce kao i željezo, ali se vrlo rijetko koristi zbog svoje cijene. Legiranje manganom također usporava formiranje  $\gamma_2$ -faze, ali mijenja i karakteristike  $\beta$ -faze tako da ju čini osjetljivijom na koroziju. [11]

Aluminijske bronce visoke čvrstoće obično sadrže 10% aluminija, 5% željeza i 5% nikla. U njima se  $\beta$ -faza prilikom hlađenja od 950 °C do 750 °C raspada na  $\alpha$ -fazu i grubu  $\kappa$ -fazu. Daljnjim hlađenjem, na nižim temperaturama preostala  $\beta$ -faza nastavlja se transformirati u  $\alpha$ -fazu i lamelarnu  $\kappa$ -fazu. Nastavkom hlađenja na sobnu temperaturu dolazi do daljnje precipitacije finih čestica  $\kappa$ -faze u  $\alpha$  kristalnim zrnima.  $\kappa$ -faza sadrži aluminij, željezo, nikal i mangan (ako ga ima u leguri) u različitim omjerima te svojom formacijom efektivno povećava maksimalnu količinu aluminija u leguri prije opasnosti od nastanka  $\gamma_2$ -faze. S obzirom na to da nikal-aluminijeve bronce ne sadrže  $\gamma_2$ -fazu, one su izrazito otporne na koroziju. Kako bi sama  $\kappa$ -faza bila otporna na koroziju, potrebno je osigurati da udio nikla u leguri bude veći od udjela željeza te da udio mangana ne premašuje 1,3%. [11]

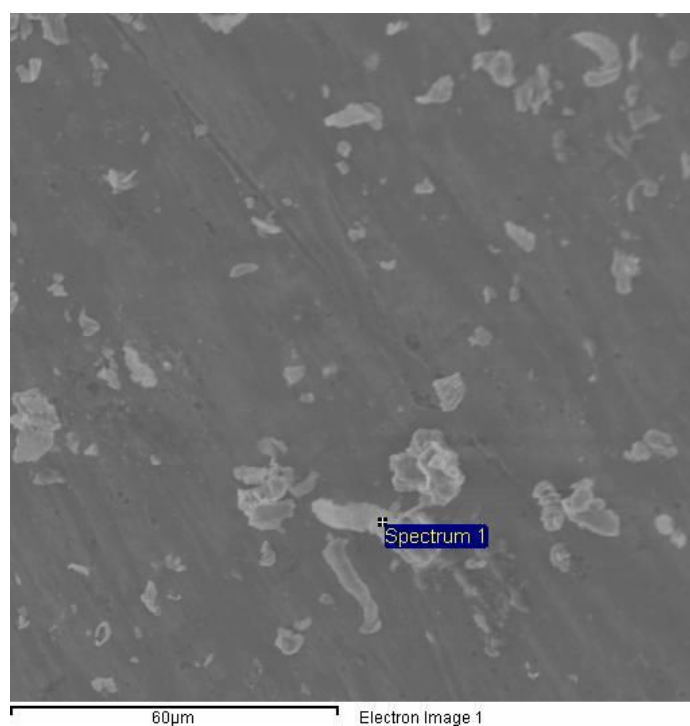
Kao posljedica navedenih mikrostrukturnih elemenata aluminijske bronce karakterizira [9]:

- sposobnost zadržavanja čvrstoće pri povišenim temperaturama, posebno kada su prisutni određeni legirni elementi,
- velika otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama,
- dobra otpornost na koroziju pri uobičajenim temperaturama uporabe,
- dobra otpornost na trošenje,



- dopadljiva boja čini neke od ovih legura uporabivim u dekorativne svrhe, osobito kao zamjena za zlato u izradi umjetnog nakita

Pod većim povećanjem vidljive su svijetlije čestice na osnovnom materijalu, slika 22, te je na njima napravljena EDS analiza..



Slika 25. Čestice

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 18.07   | 45.43   |
| O K     | 4.93    | 9.30    |
| Al K    | 12.54   | 14.04   |
| Si K    | 0.76    | 0.82    |
| Fe K    | 2.31    | 1.25    |
| Cu K    | 61.56   | 29.25   |
| Zn K    | -0.17   | -0.08   |
| Totals  | 100.00  |         |

Slika 26. Rezultat EDS analize čestica

Rezultat EDS analize na svijetloj čestici pokazuje povećanu koncentraciju bakra u odnosu na osnovni materijal alata. Budući da je alat savijao i bakrene cijevi, svijetle točke su vjerojatno

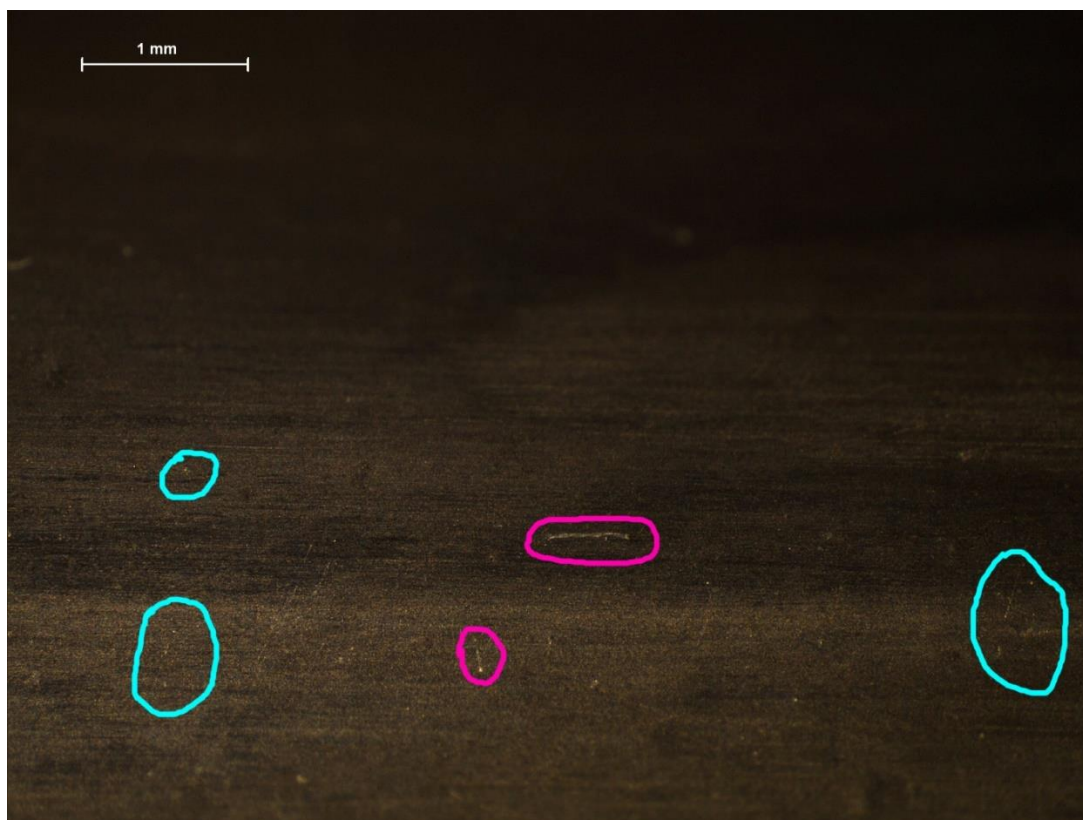
nalijepljene čestice bakra uslijed adhezijskog trošenja. Oblik čestica i činjenica da su brončani alat i bakrena cijev metalurški kompatibilni, odnosno tribološki nekompatibilni materijali idu u prilog tom zaključku.

#### 4.2.2. Optička analiza površine trošenja

Promatranjem kontaktne površine alata i cijevi na stereo optičkom mikroskopu, slika 27., jasno su vidljivi tragovi trošenja u smjeru klizanja prilikom savijanja. Također se pri dnu slike, na rubu alata vidi značajno oštećenje do kojeg je vjerojatno došlo prilikom pogrešnog ulaska cijevi u alat.



Slika 27.      Tragovi trošenja brončanog alata (povećanje 7.88x)



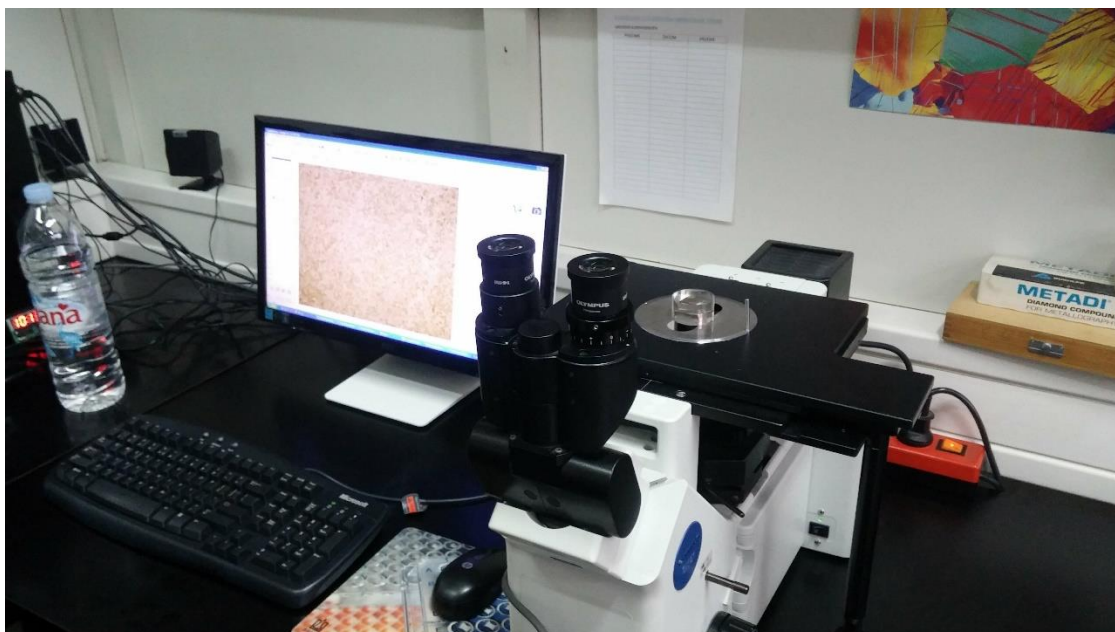
*Slika 28. Tragovi trošenja brončanog alata (povećanje 20x)*

Na povećanju 20x, slika 28., vidljivi su veći uzdužni tragovi trošenja abrazijom (označeni rozo) te točkasti tragovi trošenja (označeni plavo) koji mogu biti posljedica adhezije i umora površine. Također se može uočiti kako je gustoća točkastih oštećenja veća na lijevoj strani slike, što ima smisla s obzirom na to da je lijeva strana slike sredina alata koja je najviše opterećena prilikom savijanja. Veća sila na površinu znači da su Hertzovi kontaktni pritisci veći, a i sklonost mikrozarivanju raste. Zbog zakrivljenosti promatrane površine nije moguće dobiti oštru sliku na većem povećanju.

### 4.2.3. Metalografska analiza

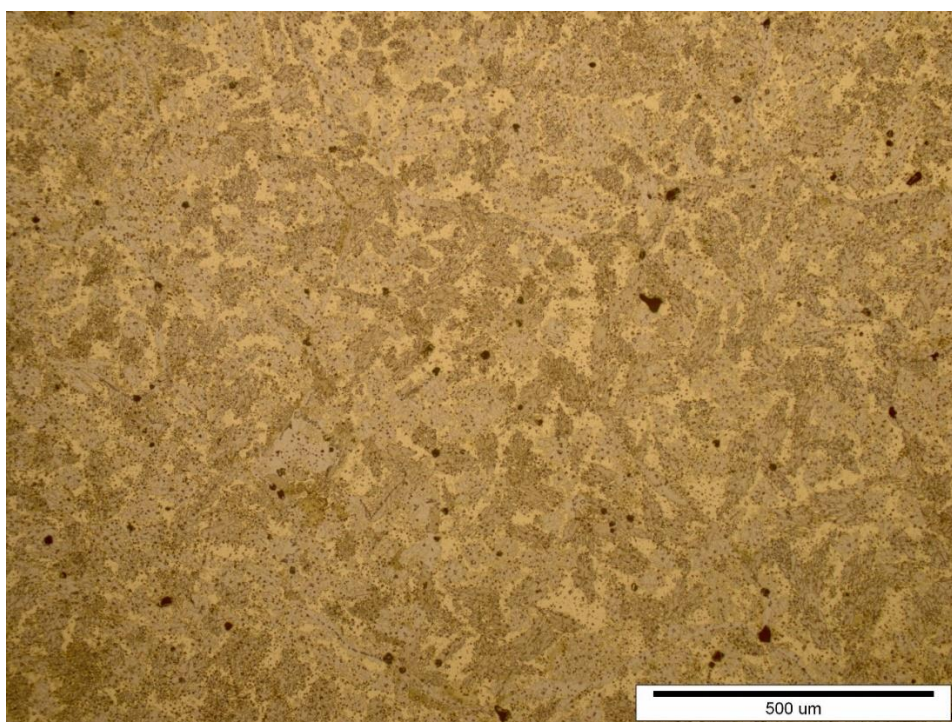
Kako bi se napravila metalografska analiza brončanog alata potrebno je pripremiti uzorak. Prvo se izrezuje komad alata i zalijeva se polimernom masom. Zatim se postepeno brusi sve finijim brusnim papirima te se u konačnici polira. Kako bi elementi mikrostrukture postali vidljivi potrebno je nagristi poliranu površinu. Za nagrizanje bakrenih legura koristi se otopina koja sadrži: 5 mg  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , 25 ml HCl, 70 ml destilirane vode.





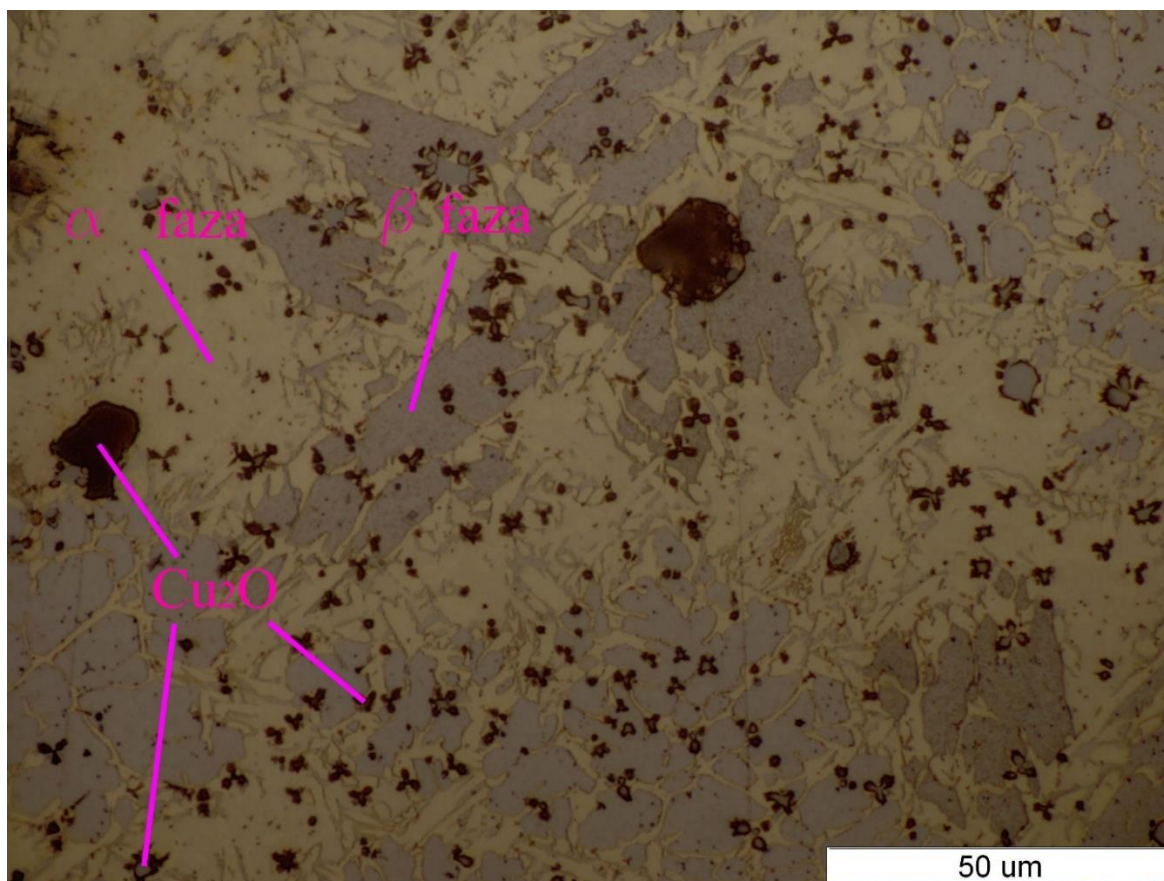
*Slika 29. Slikanje mikrostrukture na mikroskopu*

Nakon nagrizanja uzorak se stavlja na stolić mikroskopa sa pripremljenom stranom okrenutom prema dolje. Korišteni mikroskop je OLYMPUS GX51. Zatim se podešava pozicija, osvjetljenje i povećanje.



*Slika 30. Mikrostruktura alata, povećanje 100x*

Na slici 30. može se lako uočiti jednolik raspored faza što je karakteristično za mikrostrukturu sinteriranih materijala.



Slika 31. Mikrostruktura alata, povećanje 1000x

Pri povećanju 1000x se jasno može razaznati da je mikrostruktura dvofazna (označene faze s  $\alpha$  i  $\beta$ ). Jednolike raspoređene crne točkice su vrlo vjerojatno nečistoće bakrovog oksida, ali mogu biti i pore koje se često javljaju u procesu sinteriranja.

Da je materijal višefazan moguće je zaključiti i samo na osnovi rezultata mjerenja tvrdoće (tablica 4.). Mjerena je HV 0,2 tvrdoća na tvrdomjeru PMT3.



Slika 32. Tvrdomjer PMT3 [8]

| Broj mjerenja                        | $\Delta l$ | $\Delta l * 0,302$ | HV 0,2 |
|--------------------------------------|------------|--------------------|--------|
| 1.                                   | 115        | 34,75              | 308    |
| 2.                                   | 101        | 30,5               | 399    |
| 3.                                   | 103        | 31,1               | 383    |
| 4.                                   | 122        | 36,84              | 274    |
| 5.                                   | 100        | 30,2               | 407    |
| 6.                                   | 126        | 38,0               | 257    |
| 7.                                   | 104        | 31,4               | 376    |
| <b>Prosječna tvrdoća: 343 HV 0,2</b> |            |                    |        |

Tablica 4. Podaci mjerenja tvrdoće

Velik raspon dobivenih vrijednosti tvrdoće posljedica je višefaznosti strukture, tj. nasumičnosti mjesta utiska indentora. Visoke vrijednosti tvrdoće dobivene su kada je indentor pogodio u  $\beta$  fazu, a niske kada je pogodio u  $\alpha$  fazu. Stoga vrijedi zaključiti da je  $\beta$  faza vjerojatno intermetalni spoj bakra i aluminija, a  $\alpha$  faza kristal mješanac.

## 5. Zaključak

Specifični zahtjevi pojedinih industrija često prisiljavaju inženjere da razmišljaju izvan okvira konvencionalnog. Upravo se je na taj način došlo do rješenja da se skupi konvencionalni alati od sinterirane aluminijske bronce zamijene poliamidnim alatima koji pri radu ne zahtijevaju podmazivanje. Time je smanjen broj koraka u proizvodnji, poboljšani su uvjeti rada te su smanjeni troškovi proizvodnje.

Veće trošenje alata koji je savijao bakrenu cijev za vrijeme eksploatacijskog ispitivanja je iznenađujuće te nas podsjeća da unatoč svom teorijskom znanju, eksperiment je nezamjenjiv. Poliamidni alati pokazali su se dobrim izborom za zamjenski alat zbog svoje tvrdoće, čvrstoće i tribološke kompatibilnosti s materijalima cijevi koje savijaju.

Zahvaljujući SEM i EDS uređajima, danas nije problem identificirati nepoznati materijal. Tako je nepoznatoj sinteriranoj bronci određen kemijski sastav, proizvođač i ime. Alat od sinterirane aluminijske bronce, zbog loše tribološke kompatibilnosti s materijalima cijevi, se uz abraziju i umor površine troši i adhezijom. Upravo je to i razlog potrebi za podmazivanjem. Za postizanje njihove visoko uređene mikrostrukture koriste se visokotehnološki procesi što se u konačnici odražava u cijeni i mehaničkim svojstvima samog alata.



## Popis literature

- [1] K. Grilec, S. Jakovljević, „Tribologija“, Autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2015.
- [2] V. Ivušić, „Tribologija“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.
- [3] G. Heffer, „Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih čestica“, Disertacija, FSB, Zagreb, 2002.
- [4] H. Czichos, „Tribology – a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear“, Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York, 1978.
- [5] Ensminger, Dale, „Ultrasonics: data, equations, and their practical uses, Volume 10“, Boca Raton, Florida, 2009.
- [6] A. Stepić, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2013.
- [7] [https://www.ampcometal.com/documents/datasheets/en/A15\\_E.pdf](https://www.ampcometal.com/documents/datasheets/en/A15_E.pdf)
- [8] D. Pustički, „Utjecaj ECAP postupaka na mikrostrukturu aluminijskih legura“, FSB, Zagreb, 2016.
- [9] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, „Svojstva i primjena materijala“, FSB, Zagreb, 2002.
- [10] [https://www.researchgate.net/figure/253779759\\_fig4\\_Fig-4-Binary-Cu-Al-alloy-phase-diagram](https://www.researchgate.net/figure/253779759_fig4_Fig-4-Binary-Cu-Al-alloy-phase-diagram)
- [11] Copper Development Association, „Aluminium Bronze Alloys Corrosion Resistance Guide“, Publication No 80, 1981,  
<http://copperalliance.org.uk/docs/librariesprovider5/resources/pub-80-aluminium-bronze-corrosion-resistance-pdf.pdf>



## **Prilozi**

- (1) Tehnički crtež alata za savijanje cijevi
- (2) Tehnički list bakrene cijevi
- (3) Tehnički list cijevi od nehrđajućeg čelika
- (4) Nacrti i tablice iz proizvodnje
- (5) Tehnički list AMPCO 15 legure